送電線下の湿潤ロープ溶損現象の究明

正員 北村 敏* 正員 小川 照夫**

Studies of the Wet Rope's Melting Damage under the Power Transmission Lines

Satoshi Kitamura*, Member, Teruo Ogawa**, Member

All the phenomena have been solved about the wet rope's melting damage under the power lines. The results are as summarized below. A wet rope acts as a conductor with the same diameter on static induction under the power lines, and if the rope is grounded, the static current is induced on the rope as same as the conductor. The static induction current flowing through the wet rope increases by the ends of the rope, and the half of the induced current on whole rope flows out each end. The cause of wet rope's melting damage under the power lines originates in above-mentioned static induction current, and this damage occurs at the end of the rope which the induction current is maximum. The maximum static induction current, without melting damage to the wet rope is 1 mA or less at 12 mm ϕ nylon rope and 5 mA or less at 10 mm ϕ aramid rope under 500 kV power line. The range (length of the rope, distance between the rope and the power line) on which the wet rope's melting damage occurs can be checked from Table 4 and Fig. 10.

キーワード：送電線，静電誘導，湿潤ロープ発熱溶損

Keywords: power transmission line, electrostatic induction, wet rope's melting damage

1. はじめに

これまでに，送電線の線下に電線と平行に張られた工事用のロープ（主としてアラミド，ナイロンなどの化学繊維を撚り合わせたもの）が溶損するという現象が散見されている。この現象には以下の共通点が認められる。すなわち，

- 500 kV など高電圧が課電中の送電線である。
- 降雨中は溶損せず，雨上り後の数時間に溶損する。
- 溶損箇所は張られたロープの端部付近（鉄塔，鉄柱などへの取付点付近）に限られる。
- ロープの溶損箇所には，撚り合わされた化学繊維の局部に炭化痕や溶解が視認でき，細いナイロン製のロープでは溶断に至る場合もある。
- 溶損したロープと送電線の配置関係は，概略，下相電線とロープとの離隔が 10 数メートル，電線と平行するロープ長は数 10 メートル以上である。

というものである。本論文では，上記の手掛かりに基づき以下の諸点を明らかにする。

- ロープの溶損原因
- ロープが溶損に至るメカニズム
- ロープが溶損しない諸条件

2. 湿潤ロープの溶損原因

ロープの溶損が，高電圧課電中の送電線下で生じているため，溶損の原因として次の 3 点が想定される。

- 送電線からロープへの静電誘導
- 送電線近傍の強電界によるロープからのコロナ放電
- 送電線からロープへの電磁誘導

これらの想定要因から，湿潤ロープの電気特性を明らかにし真の溶損原因を特定する。

2・1 湿潤ロープに流れる静電誘導電流 静電誘導に対する湿潤ロープの挙動を明らかにするため，課電実験による静電誘導電流の計測と理論値による評価を行う。

図 1 実験回路

Fig. 1. Composition of the experiment circuit.

* 東電設計（株）電気本部
〒110-0015 東京都台東区東上野 3-3-3
Tokyo Electric Power Services Co., Ltd.
3-3-3, Higashi-Ueno, Taitou-ku, Tokyo 110-0015

**（株）関電工 工務部
〒108-8533 東京都港区芝浦 4-8-33
Kanden Co., Ltd.
4-8-33, Shibaura, Minato-ku, Tokyo 108-8533

(1) 課電実験の方法 図1に実験回路を示す。2本の円筒導体(半径 $a_1 = a_2 = 0.015\text{ m}$, 長さ 1 m)を間隔 $d = 0.15\text{ m}$ で床にアルミ板を敷き詰めた($1.8 \times 2.7\text{ m}$)接地面から h_1, h_2 の高さに支持がいしにより固定する。支持がいしは天端金具A, Bが誘導に大きく影響しないよう, 円筒導体の両端を天端金具の端に固定する(図1平面図)。アルミ板と課電設備の接地端子は建物の接地線と接続する。

一方の円筒導体1に電圧 V_1 を課電し, もう一方の円筒導体2をアルミ板に接地するときに流れる静電誘導電流 I_2 を計測する。 I_2 の計測には, 誘導の影響を排除するため静電シールドした導線を用いる。この実験で重要なのは理論値との整合性であり I_2 の計測値は理論値と一致する必要がある。

続いて, I_2 を計測した円筒導体2を工事用のロープに取替えて計測する。ロープは, 湿潤のほか乾燥と湿潤汚損の状態も計測する。図2は実験の外観写真である。

(2) 実験結果 表1, 表2に実験結果を示す。表1は円筒導体2への静電誘導電流計測結果である。同表の天端金具A+Bは円筒導体2を固定する支持がいし天端金具A, Bへの静電誘導電流であり, 円筒導体2を配置する前に計測した。円筒導体2のCは天端金具も含めた静電誘導電流, C-A-Bは天端金具を除いた円筒導体2だけへの静電誘導電流計測値であり理論値との比較の対象となる。

理論値Dは, 無限長平行導体の電圧 V_i と電荷量 Q_i の関係($i = 1, 2$)より次式から求められる⁽¹⁾。

$$Q_1 \ell n \frac{2h_1}{a_1} + Q_2 \ell n \frac{\sqrt{(h_1 + h_2)^2 + d^2}}{\sqrt{(h_1 - h_2)^2 + d^2}} = 2\pi\epsilon_0 V_1$$

$$Q_1 \ell n \frac{\sqrt{(h_1 + h_2)^2 + d^2}}{\sqrt{(h_1 - h_2)^2 + d^2}} + Q_2 \ell n \frac{2h_2}{a_2} = 2\pi\epsilon_0 V_2$$

以上の2式に $V_2 = 0$ を与えて Q_2 を求めれば理論値Dは(1)式の I_2 として算出される。ここに課電周波数 $f = 50\text{ Hz}$ であり, $h_1 = h_2 = 0.563\text{ m}$ である。

$$I_2 = 2\pi f Q_2 \dots\dots\dots (1)$$

計測値C-A-Bは理論値Dより10%前後少なくなっているが, Dは無限長導体における1m当たりの静電誘導電流であり, 1mの円筒導体としての数値計算結果(表6)と計測値はほぼ合致する。従って, 表1の結果は理論値と整合すると見なしてよい。

表2は, 円筒導体2を工事用ロープ(10mmφナイロンロープ)に取替えた結果を示す。ロープは長さ1m, 支持がいし天端金具Aに固定した端からアルミ板に接地するときに流れる静電誘導電流 I_2 を計測した。乾燥ロープEの電流には, ロープの抵抗が高いので天端金具Bへの誘導電流は流入せず, E-Aが乾燥ロープだけへの静電誘導電流となる。湿潤ロープFは水道水に30分間浸した後, ロープ表面の滴を布で拭き取った状態で計測した。Fには天端金具A, Bへの誘導電流が含まれるのでF-A-Bが湿潤ロープだけへの静電誘導電流となる。同様に, 湿潤汚損ロープG-A-Bは海水濃度の約1/5に相当する6g/リットルの食塩水に浸した結果である。降雨の塩分濃度が最大(強風時の海岸近く)で0.1g/リットルであり⁽²⁾, 6g/リットルは過酷な条件となる。

円筒導体2と同様, (1)式により求めたロープと同一径の円筒導体に対する静電誘導電流の理論値をDに示す。た

図2 円筒導体に対する課電実験

Fig.2. Electrostatic induction tests to Cylindrical conductors.

表1 円筒導体2の静電誘導電流(mA)

Table 1. Static induction current flowing through cylindrical conductor 2 (mA).

Voltage V_1 (kV)	Shield ring A+B	Conductor 2		Calculated D
		C	C-A-B	
30	0.049	0.118	0.069	0.073
40	0.064	0.151	0.087	0.097
50	0.079	0.187	0.108	0.122

表2 10mmφナイロンロープに流入する静電誘導電流(mA)

Table 2. Static induction current flowing through the 10mmφ Nylon ropes (mA).

Voltage (kV)	Shield ring A	Shield ring B	Dry rope		Wet rope		Wet polluted rope		Calculated D
			E	E-A	F	F-A-B	G	G-A-B	
30	0.019	0.030	0.019	0.000	0.095	0.046	0.096	0.047	0.055
40	0.024	0.040	0.025	0.001	0.127	0.063	0.130	0.066	0.073
50	0.030	0.049	0.032	0.002	0.170	0.091	0.178	0.099	0.091
Rope resistance (MΩ/m)			∞		3		0.1		—

だしローブの半径, 高さは $a_2 = 0.005 \text{ m}$, $h_2 = 0.545 \text{ m}$ である。D と F-A-B, G-A-B を比べると, 湿潤ローブへの静電誘導電流は D とほぼ一致する。なお初期の計測では, 課電電圧が高くなるほど電流計測値が表 2 の値を上回った。特に湿潤汚損ローブでの電流値が大きく計測された原因が, 細いローブ (10 mmφ) からのコロナ放電により発生する高周波が計測器に影響を与えるためと判明した。このため, 表 2 の計測には表 1 と異なり高周波の影響を受け難い計器を用いている。

以上の結果から, 次が結論できる。

- 湿潤ローブは静電誘導に対し導体として振る舞い, 同ローブを接地するとローブと同一径の導体と同じ大きさの静電誘導電流が流出する。
- 汚損の有無により上記の電流値は変わらない。
- 乾燥ローブへの静電誘導電流は無視できる。

また, 別の工事用ローブ (14 mmφ アラミドロブ) による実験結果でも上記の結論は変わらない。

2・2 湿潤ローブからの放電電流 湿潤ローブからのコロナ放電によるローブ損傷の可能性を調べるため, 図 2 の課電装置を用いて同装置の最高電圧 100 kV を湿潤ローブに直接課電する。課電方法は, 図 1 の円筒導体 1 を湿潤させた 10 mmφ ナイロンローブに取替えて, これに 100 kV を課電した。円筒導体 2 は取り除いた。30 分の連続課電後, ローブ表面には異常が認められなかった。500 kV 送電線においても, ローブに 100 kV 課電相当の電界が作用する状況は生じないが, これらの結果をもって湿潤ローブに放電損傷の恐れなしとは結論できない。

表 3 は今回の課電実験に基づき, 送電線下の電界ではローブに放電損傷の生じないことを示す試算結果である。すなわち (1) 式に準じて $a_1 = 0.005 \text{ m}$, $h_1 = 0.545 \text{ m}$, $V_1 = 100 \text{ kV}$ より湿潤ローブの充電電流 $I_1 = 2\pi f Q_1$ を求めれば, I_1 のうちローブ表面からのコロナ放電によって空気中に放出される電流は, 現実には極めて僅かである。表 3 の放電電流密度は, この I_1 が全てローブ表面から放出されると仮定して求めた値であるが, それでも表 2 の静電誘導電流 (D の値をローブ断面の電流密度で示すと $0.07 \sim 0.12 \text{ mA/cm}^2$) に比べて 2 桁小さい。従って, 送電線下で想定される強電界に起因するローブ表面からのコロナ放電では溶損は生じないと結論できる。

2・3 湿潤ローブに流れる電磁誘導電流 表 2 には 1000 V 絶縁抵抗計による湿潤ローブの電気抵抗計測値を併記した。計測値は安定しなかったのが目安にしかない

が, 電磁誘導電流の予測には十分である。

一般に送電線の停止回線あるいは架空地線に流れる電磁誘導電流は, 電圧階級や電線サイズによっても異なるが送電電流の 20% を超える例は少ない。すなわち, I_s, I_m, Z_s, Z_m をそれぞれ送電線の送電電流, 電磁誘導電流, 自己インピーダンス, 相互インピーダンスとすると

$$I_m/I_s = Z_m/Z_s$$

が成立つ。 I_m の上限を与えるインピーダンスは, 概略, $Z_s = 0.5, Z_m = 0.1 \Omega/\text{km}$ となるので, これを湿潤ローブに置き換えると I_m が大きくなる湿潤汚損状態を想定しても $Z_s = 100 \text{ M}\Omega/\text{km}$ となって $I_m/I_s = 10^{-9}$ のオーダーとなる。すなわち $I_s = 10 \text{ kA}$ と想定しても $I_m = 0.01 \text{ mA}$ 程度となり表 2 の静電誘導電流を 1 桁下回る。

表 2 の静電誘導電流は, ローブ長が 1 m の値であり 100 m となれば同電流も 100 倍となる。一方, 上述の放電電流密度や電磁誘導電流はローブ長と無関係であるので, 湿潤ローブを流れる電流は静電誘導電流に限定して考えればよい。すなわちローブの溶損原因は, 湿潤ローブを接地したときに流出する静電誘導電流に特定できる。

3. 湿潤ローブが溶損に至るメカニズム

湿潤ローブが溶損しない静電誘導電流の上限値を明らかにするには, 現実の送電線下における同ローブへの静電誘導現象をさらに解明しなければならない。

図 3 は, 送電線から湿潤ローブへの静電誘導作用を模擬した回路図である。課電回線を電圧 V_1 とする 1 本の導体で代表し, 湿潤ローブの両端は R_a, R_b の接触抵抗で接地されている。 R, Y_s, Y_m はそれぞれ湿潤ローブ単位長さ当たりの抵抗, 大地アドミタンス, 課電回線～ローブ間の相互アドミタンスである。ローブ端から距離 x の点のローブの静電誘導電圧, 電流 V_0, I_0 は次式を満足する⁽³⁾。

$$\begin{aligned} \frac{dV_0}{dx} &= -RI_0 \\ \frac{dI_0}{dx} &= -Y_s V_0 - Y_m (V_0 - V_1) \end{aligned}$$

上式の解 V_0, I_0 は, A, B を定数として

$$V_0 = Ae^{-\gamma x} + Be^{\gamma x} + \frac{RY_m}{\gamma^2} V_1$$

図 3 送電線から湿潤ローブへの静電誘導を模擬した回路

Fig. 3. Circuit simulating electrostatic induction from a power line to the wet rope.

表 3 湿潤ローブの放電電流密度

Table 3. Discharge current density of the wet rope.

Testing voltage V_1 (kV)	Charging current I_1 (mA)	Surface E. field (kV/cm)	Current density (mA/cm ²)
100	0.325	37.1	0.0010

$$I_0 = \frac{\gamma}{R}(Ae^{-\gamma x} - Be^{\gamma x})$$

により与えられる。ここに $\gamma^2 = R(Y_s + Y_m)$ であり、 $dV_1/dx = 0$ とした。上式の定数 A, B は湿潤ロープ端の条件、 $V_0 = -R_a I_0 (x = 0)$ 、 $V_0 = R_b I_0 (x = \ell)$ から定まる。図4は、ロープ端の電流 I_0 と R, R_a, R_b の関係をまとめたものであるが、 I_0 の状況把握のため $\gamma R_a/R \approx \gamma R_b/R \ll 1$ として求めた I_0 の近似式を (2) 式に示した。

$$I_0 \approx -\frac{\ell - 2x}{2} Y_m V_1 \dots \dots \dots (2)$$

図4と(2)式から、送電線下の湿潤ロープに対する静電誘導現象を以下に要約する。

- $R_a = R_b$ 、 $R \leq 1 \text{ M}\Omega/\text{m}$ の場合、 R_a, R_b が $1 \text{ M}\Omega$ 前後以下であれば R_a, R_b の値に無関係に同径導体に誘導される全静電誘導電流 ($Y_m V_1 \ell$) の各 $1/2$ がロープの両端から流出する。
- $R_a \neq R_b$ の場合、通常の湿潤ロープ ($R \geq 1 \text{ M}\Omega/\text{m}$) では R が増すほどロープ両端から流出する電流並びにその差は小さくなる (図4の点線)。
- 湿潤ロープを流れる静電誘導電流は、ロープの中央部 ($x = \ell/2$) では零であり、ロープ両端で最大となる ((2) 式)。
- 従って、ロープの溶損はロープ端で生ずる。

これらの結果から、湿潤ロープが溶損に至るメカニズムが明らかとなる。すなわち、送電線下に張られたロープが降雨により湿潤するとロープが静電誘導的に同径の導体のように振る舞い、ロープ長に応じた静電誘導電流が誘導される。誘導された電流の各々 $1/2$ がロープ両端の支持点か

500 kV 送電線下相直下 7.3 m に 100 m のロープを配置した場合の計算値。ロープへの静電誘導電圧 $V_0 = Y_m V_1 / (Y_m + Y_s) = 82 \text{ kV}$ 、湿潤ロープ全体への静電誘導電流 $Y_m V_1 \ell = 6 \text{ mA}$ 。

図4 ロープ端電流 I_0 と R, R_a, R_b の関係

Fig. 4. Relation between the rope end current I_0 and R, R_a, R_b .

ら鉄柱などの支持物を介して流出する。雨が止むと、この電流による発熱によって電流の最も大きいロープ両端部が徐々に乾燥し、それに応じてその部分の抵抗が上昇するので両端部の発熱は一層増加する。重要であるのは、ロープの両端近傍の数 m を除けば湿潤状態が維持されて、降雨時と同様な静電誘導電流がロープ端に供給され続ける点である。従って、ロープが長くなり静電誘導電流がある限度を超えると発熱によりロープは溶損に至ると想定される。

4. 湿潤ロープの溶損限界電流

以上の推定に基づいて、ロープが溶損しない上限電流 (以下、溶損限界電流という) を通電実験により明らかにする。

4.1 通電実験の方法 図5に通電実験の状況を示す。湿潤ロープ約 3 m の両端をがいしで絶縁し、約 0.4 kN の張力を加えて水平に張る。ロープの中ほどを電流が局部的に集中しないよう導体を巻付け、この導体を接地する。接地点から約 1.5 m の位置に同様に導体を巻付け、この点に電圧 V を課せしロープに電流 I を通電して溶損の有無を見極める。ここに I の初期値は降雨時のロープ端電流、すなわち (2) 式で $x = \ell$ として得られる $I_0 = (Y_m \ell / 2) V_1$ に設定する。現実の送電線下では I_0 によりロープ端が乾燥しその抵抗 Z が $Y_m \ell$ との関係である値以上 (図4では $Z = R_a = R_b = 10 \text{ M}\Omega$ 前後以上) となると I は低下してくる。しかし $Y_m \ell$ 相当のアドミタンス (10^{-6} S オーダ) を実験で再現することは難しいので、送電線から湿潤ロープへの静電誘導電流を図6の回路で模擬して実験する。すなわち、図6からロープへの通電電流 I を

$$I = I_0 - (Y_m \ell / 2) V \dots \dots \dots (3)$$

として I と V が (3) 式を満たすようにコントロールする。(3) 式から以下が明らかとなる。

- ロープ端の発熱 $P = VI$ は $I = I_0/2$ 、 $V = V_1/2$ において最大となる。
- 溶損限界電流を通電電流初期値 I_0 で評価し、 I が $I_0/2$ 以下となるまで実験を継続して、各種ロープに対する溶損限界電流を見極める必要がある。
- $Y_m \ell$ が小さいほど Z の増大に伴う I の低下が少ない。

図5 通電実験の状況

Fig. 5. Current test flowing through wet rope.

図6 湿潤ロープへの静電誘導等価回路

Fig. 6. Equivalent circuit obtaining static induction current flowing through wet rope.

表4 各種湿潤ロープの溶損限界電流 I_0
(実験値: mA)

Table 4. Maximum current I_0 to the wet ropes without melting damage (Experimental value: mA).

Ropes	500 kV	275 kV	154 kV
12mm ϕ nylon	1.0	1.5	3.0
10mm aramid	5.0	7.0	12
14mm polyester	—	8.0	11

アラミドロープ、ポリエステルロープは、同ロープの繊維間でアーク放電が生じなかった最大電流値をもって溶損限界電流とした。

一般に V_1 が大きいほど $Y_m \ell$ は小さくなるので送電電圧が高いほど溶損限界電流は低下する。

なお、実際の実験では電流初期値 I_0 ($V = 0$) を通電するのに初期電圧 V が必要だがこの値は最大発熱となる $V = V_1/2$ に比べて十分小さいので (3) 式では初期電圧を無視している。

4.2 通電実験結果 各種工事事用湿潤ロープの通電予備実験の結果から、溶損限界電流が数 mA 前後の低レベルにあることが判明した。このレベルで課電電圧 V を 100 kV 前後まで増大させる通電実験を精度高く行うため、以下の対策を講じて溶損限界電流の計測精度を確保した。

- 湿潤ロープの充電電流 ($V = 100$ kV で 1 mA 前後) と両端がいしからの漏洩電流を計測値に含めないため、ロープの接地導線に流れる電流を直接計測する。

表4は各種湿潤ロープの溶損限界電流を整理した結果である。例えば、500 kV 線路における 12 mm ϕ ナイロンロープの溶損限界電流 1.0 mA は、(3) 式に $V_1 = 550\sqrt{3}$ kV, $I_0 = (Y_m \ell / 2) V_1 = 1.0$ mA ($Y_m \ell = 6.3 \times 10^{-6}$ S) を与えて、課電電圧 V に対する通電電流 I を (3) 式でコントロールしながら実験した結果、同ロープが実験終了まで溶損しなかったことを示している。表4だけでは溶損の詳細がわからないので、実験で判明した主要な点を以下に併記する。

- 完全な湿潤状態から通電実験を行うとロープが電流で乾燥し発熱溶損に至るまで3時間以上を要するため、ロープを振って水分をある程度放出した状態で実験した。
- ナイロンロープは、表4の2倍前後の電流値以上ではほとんどが溶断した (図7, 図8)。
- ナイロンロープの溶断箇所は、ロープの通電点および接地点から 10 cm 以内にはなかったが、両点の間にランダムに分布している。
- アラミド並びにポリエステルロープは、表4の電流を

図7 湿潤ロープの溶損状況

Fig. 7. Wet rope's melting damage.

図8 12 mm ϕ ナイロンロープの試験電流と溶損状態の関係

Fig. 8. Relation between test currents and the rope conditions (12 mm ϕ nylon ropes).

超えるとロープの繊維間でアーク放電が発生したが溶断は皆無であった。

- アラミド並びにポリエステルロープのアーク放電箇所には炭化痕や溶解が認められたが、アークの発生箇所には偏りはなかった (図7)。

図8に 12 mm ϕ ナイロンロープの溶損状態と通電初期電流 $I_0 = (Y_m \ell / 2) V_1$, 最大発熱 $P_{\max} = (Y_m \ell / 8) V_1^2$ の関係を示す。 $P_{\max}$ が 70 W 前後以上でロープの溶損が始まり 140 W 前後以上で溶断に至るように見えるが、アラミド・ポリエステルロープでは、図8のように明瞭な関係は得られない。

なお現実の送電線下では、表4より溶損限界電流は下回らないと考えてよい。なぜなら、静電誘導電流はロープの

図9 ロープが溶損しない通電電流と発熱の推移

Fig. 9. Transition of test currents flowing through the wet rope and Joule heat without melting.

両端から流出し一方の端が乾燥して抵抗がより上昇すると、図4からもう一方の端に電流が移行して急激なロープ端発熱の上昇が抑えられるためである。なお、図9に溶損限界電流以下での実験結果を示す。発熱 $P = VI$ は $I = I_0/2$ の時点でピーク値 $P_{\max} = (Y_m \ell / 8) V_1^2$ に達し、その後発熱が急激に低下するためロープに溶損は認められない。

5. ロープが溶損しない諸条件

溶損限界電流の実験結果に基づき、ロープが溶損しない諸条件（送電線との接近距離、ロープ長さなど）を明らかにする。

5.1 湿潤ロープに流れる静電誘導電流の予測式 湿潤ロープへの静電誘導電流は、ロープが送電線と平行に張られる場合には(4)式からロープの電荷量 Q_n を求め(1)式に準じて算出する。

$$V_i = \sum_{j=1}^n P_{ij} Q_j \quad (i = 1, 2, \dots, n) \dots \dots \dots (4)$$

ここに、 $V_i (i = 1, 2, \dots, n-1)$: 送電線の電位、 V_n : ロープの電位で $V_n = 0$ 、 P_{ij} : 電位係数で送電線の各相導体、ロープの座標を複素数で $r_i = x_i + jy_i$ 、 $r'_i = x_i - jy_i$ とするとき $P_{ij} = (1/2\pi\epsilon_0) \ln |r'_{ij}/r_{ij}|$ ただし $r_{ij} = r_i - r_j$ 、 $r'_{ij} = r_i - r'_j$ である。なお $r_{ii} = a_i$ (導体半径) とする。

ロープが送電線に対し垂直に設けられる場合には、ロープを同径の導体球が連続したものとして、例えば $i = m, m+1, \dots, n$ をロープとすれば、(4)式の P_{ij} を以下の通り変更し $Q_j (i = m, m+1, \dots, n)$ の総和を求めることにより算出する。

- $P_{ij} = (1/4\pi\epsilon_0)(1/|r_i - r_j| - 1/|r_i - r'_j|) (i, j = m, m+1, \dots, n)$
- $P_{ij} = 0 (i = 1, 2, \dots, m-1; j = m, m+1, \dots, n)$ すなわち導体球による電荷は、無限長導体である送電線の

図10 送電線下の湿潤ロープへの静電誘導電流

Fig. 10. Static induction current flowing through the wet rope under the power line.

電位には影響を与えない。

- また $P_{ij} = (1/2\pi\epsilon_0) \ln |r'_{ij}/r_{ij}| (i = m, m+1, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m-1)$ すなわち、送電線による電荷は導体球の電位に影響する。

5.2 湿潤ロープへの静電誘導電流 湿潤ロープへの誘導電流が、表4の2倍以下ならばロープ溶損の恐れはない。従って、送電線下でのロープ配置が決まれば上記予測式により溶損防止対策を講じるロープ長が決定できる。

図10に、代表的な2回線送電線の下相直下に16mmφロープを配置した場合の静電誘導電流予測値（ロープの両端に流出する電流の合計値；ロープ長100m当たり）と下相とロープの離隔距離の関係を示す。図10では、ロープへの静電誘導電流が最大となるよう送電回線の下相直下にロープを配置し、もう1回線は停止接地の状態で算出している。

表4と図10から、送電線下に電線と平行に張られたロープの溶損範囲を求めることができる。具体例として500kV送電線の直下に下相から10mの離隔で16mmφアラミドロープを張る場合の溶損しないロープ長を求める。図10の横軸10mに対応した500kVの $2I_0$ として、14mA/100mを得る。すなわち、湿潤ロープ100m当たり14mAの静電誘導電流が誘導され、ロープの両端からはそれぞれ7.0mAが流出することが判る。また表4から500kVにおける10mmφアラミドロープの溶損限界電流が $I_0 = 5.0$ mA であることが判るので、16mmφでは限界電流の上昇が期待できるが、10mmφと同じく5.0mAと仮定すると、溶損しないロープ長として $100 \text{ m} \times (5.0/7.0) = 71 \text{ m}$ 以下を得る。

表 5 垂直ロープへの静電誘導電流 (mA)

Table 5. Static induction current to the hang down rope (mA).

Voltage	500 kV		275 kV	154 kV
G~C ₁	0.60	(1.4)	0.30	0.05
G~C ₂	0.94	(2.4)	0.45	0.08
G~C ₃	0.63	(1.4)	0.30	0.05
G~Ground	0.55	—	0.53	0.13

G~C₁ : Between ground wire and top conductor

電線サイズ, 下相地上高は図 9 に同じ。() 内は支柱材に沿わせたロープへの誘導電流でロープと下相との水平離隔は 5.5 m。

表 6 導体球への静電誘導電流値 I_2 に対する換算率Table 6. The rate to static induction current I_2 flowing through continuous sphere conductors.

Conductor	d / h	ℓ	I_2	Rate
Cylinder	0.15 / 0.5	∞	1	1
Continuous spheres		15	0.89	1.12
		1	0.80	—
Cylinder	3 / 10	∞	1	1
C.spheres		30	0.80	1.25

円筒ならびに導体球の半径は 1.5 cm。d,h は図 1 の関係にある。d/h に対する連続球の長さ ℓ を 15, 30 m とすることで無限長と見なした。表 1 の D の値に換算率 0.8×1.12 を乗れば 1 m アルミ円筒への正確な静電誘導電流値を得る。

表 5 は, 停止回線側の径間途中で架空地線の高さ G から 16 mm ϕ ロープを垂直に垂らした場合の静電誘導電流予測値である。垂直ロープの場合の送電回線との水平離隔は, 停止回線の各相にロープで機材を吊り上げる場合を想定して回線間水平離隔の最小値を適用している。また, 鉄塔支柱材に沿わしてロープを下げるケースも想定し, 500 kV の送電回線側に支柱材から 50 cm 線路側に 16 mm ϕ ロープに沿わした場合の電流値も参考に示した(鉄塔支柱材も 30 cm 外径の同体球が連続したものとして送電回線側の 2 脚を模擬。支柱材を模擬しない場合のロープ電流は表 5 の() 内の約 2 倍となる)。

垂直にロープを配置する場合は, 送電回線各相の位相差によってロープへの静電誘導電流はロープの位置によって変化する。従って表 5 では, $G \sim C_1$ (上相), $G \sim C_3$ (下相) などの電流値で示しているが, 例えば $G \sim C_3$ 欄に示した電流値は架空地線 G と下相位置でロープを接地した場合にその両端に流れる誘導電流の合計値であり, この場合は両端に 1/2 ずつ電流が分流しないことに注意する。なお, 表 5 の算出には連続導体球と円筒導体への誘導電流の違いを考慮して, 表 6 の換算率 ($1/I_2$) を用いて補正している。換算率は無限長円筒導体への誘導電流計算値と合致させるために, 同径の連続密着導体球への静電誘導電流計算値に乘

ずる倍率である。すなわち表 5 の電流値は, 導体球に対する計算電流値を 1.25 倍して掲げている。

以上から得られる結論は次の通り。

- 送電線下にロープを水平に張る場合には, ロープの溶損範囲を表 4 と図 10 から確かめる。
- 停止回線から垂らした垂直ロープには溶損の恐れはない。
- ナイロンロープを 500 kV 送電鉄塔の支柱材に沿わせて垂らす場合には溶損の可能性はあるが, 通常は支柱材に細かくロープの支持点(サポート金具)を設けるので溶損は考えなくてよい。

6. む す び

送電線の近傍に張られた湿潤ロープの溶損現象について, その全容を究明した。結果を以下に要約する。

(1) 湿潤ロープは, 送電線からの静電誘導に対して導体として振る舞い, 同ロープを接地するとロープと同一径の導体と同じ大きさの静電誘導電流が流れる。

(2) 湿潤ロープを流れる静電誘導電流は, ロープの両端に近づくほど大きくなり, ロープの両端取付け点からはロープに誘導される全静電誘導電流の各 1/2 が流出する。

(3) 送電線近傍における湿潤ロープの溶損現象は, この静電誘導電流に起因し, 同電流が最大となるロープ端近傍で溶損が生じる。

(4) 湿潤ロープが溶損しない溶損限界電流は送電電圧が高いほど小さくなり, 500 kV 線路ではナイロンロープが 1 mA 前後, アラミドロープでは 5 mA 前後となる。

(5) 送電線下に電線と平行にロープを張る場合には, ロープが溶損する範囲を表 4 と図 10 から確認し, 溶損範囲にあるロープでは, 静電誘導電流が表 4 の値を超えないようロープを絶縁するなどの溶損防止対策を講ずる。

(6) 停止回線から垂らした垂直ロープへの静電誘導電流は少ないので溶損の恐れはない。

(7) ナイロンロープを 500 kV 送電鉄塔の支柱材に沿わせて垂らす場合, ロープ取付点の位置によっては溶損の可能性があるので支柱材に細かくロープ支持点(サポート金具)を設けて溶損を防止する。

終りに, 関係者の努力によりロープの溶損防止対策が確立されたことを付記する。今回の究明では多くの方々にご協力を頂いた。最後に, 関係者の氏名を掲げて謝意を表します。湿潤ロープの電気特性実験: 吉野恵一(東京電力)飯田健二, 相田通武(東電設計)。溶損限界電流の究明実験: 井口勝弘, 荻野進, 橋本貴司, 岩本俊英(関電工)小野貴章, 福島照二(東光電気工事)白土武彦, 秋山宏(千歳電気工業)佐藤成知(サンテック)芳賀一成(岳南建設)服部次男(古河電気工業)大和田憲也(佐藤建設工業)首藤洋一(東京製綱繊維ロープ)丸岡清文(藤井電工)梅澤直人(東京電力)。

また, 大石祐司(東京電力)風間治夫(関電工)の両氏には筆者がこの問題と取組む機会を提供頂いた。月岡桂吉

氏（光研社）には高電圧下での計測にあたり指導を頂いた。
（平成 16 年 7 月 8 日受付，平成 16 年 12 月 27 日再受付）

文 献

- （ 1 ） 山田直平：電気磁気学，電気学会（1966-6）
- （ 2 ） 塩害対策専門委員会送变电分科会：「送变电設備の塩害対策」，電気協同研究，Vol.20，No.2（1964-4）
- （ 3 ） M. Yoshioka and S. Kitamura: “Study on Grounding in Vicinity of the Work Site on 1000 kV Power Transmission Line (Part 1)”, *T. IEE Japan*, Vol.110-B, No.12, pp.1021–1022 (1990-12) (in Japanese)
- 吉岡正幸・北村 敏：「100 万 V 送電線路の作業用現場接地に関する考察と検証（その 1. 静電誘導とその防護）」，電学論 B, **110**, 12, pp.1021–1022 (1990-12)

北 村 敏（正員）1947 年 11 月 7 日生。1970 年 3 月東海大学工学部電気工学科卒業。同年東京電力（株）入社。主として，送電線の設計・管理・技術開発に従事。現在，東電設計（株）電気本部。工学博士。

小 川 照 夫（正員）1949 年 10 月 17 日生。1974 年 3 月室蘭工業大学工学部 II 部電気工学科卒業。同年関東電気工事（株）入社。主として，送電線建設工事の設計・管理・技術開発に従事。現在，（株）関電工工務部。技術士（電気電子部門）。